1П

УДК 519.237.5

Ю.А. Прокопчук
Институт технической механики НАН и НКА Украины, г. Днепропетровск, Украина
itk3@ukr.net

Интеллектуальное синергетическое управление динамическими системами

Построена модель интеллектуального синергетического управления динамическими системами, которая обладает рядом полезных свойств, среди которых – нежесткие требования к формализму, учет имеющихся ресурсов и изменчивости критериев истинности, невысокая чувствительность модели к априорной полноте описания состояний, высокая способность к адаптации в изменяющейся среде, учет реальной компетентности управляющего агента. Эти свойства становятся решающими при управлении поведением социальных и живых систем.

Введение

Целью интеллектуального синергетического управления динамической системой является определение модели поведения системы (модель задает целевой аттрактор и параметры порядка) и реализация способа направленной самоорганизации, т.е. направленного движения вдоль желаемых инвариантных многообразий – аттракторов, к которым подстраиваются все другие переменные динамической системы [1-4]. Отсюда вытекает идеология процессов обработки информации и управления в сложных нелинейных динамических системах. Необходимо, чтобы указанные процессы включали, по меньшей мере, две фазы: фазу расширения и фазу сжатия пространства состояний [2-4]. При этом в фазе расширения определяется модель поведения системы, формируется множество различных сценариев развития, задаются значения параметрам порядка. В фазе сжатия система движется в области притяжения целевого аттрактора. На длительных интервалах наблюдения фазы расширения и сжатия будут чередоваться.

В рамках интеллектуального синергетического управления фазу расширения предлагается реализовывать на основе модели знаний и определенным образом организованного *мышления*. Под *знаниями системы* будем понимать фрактальный самоорганизующийся информационный поток в специфической (информационной) среде (создаваемый собственными функциями среды), опирающийся на свойства физического носителя и обеспечивающий целенаправленное поведение системы, включая совершенствование знаний. Как следует из данного определения, знание существенно опирается на поведенческие автоматизмы физического носителя (среды). В результате самоорганизации информационного потока образуются «мыслительные аттракторы». В знании можно выделить образы, фрагменты, кванты разного уровня общности (фрактальность и делимость знания). Являясь динамическим потоком, знание активно. Знание можно тестировать с помощью того или иного целенаправленного поведения.

Под *мышлением* (выводом) будем понимать управляемый энергетический резонанс во фрактальной вычислительной среде, содержащей полную модель знаний. Под управлением понимается задание движущей силы вида: $\{f/\mu\text{: } \{o/O\} \rightarrow \{o/O\}'\}$, где f/μ – отображение/механизм, реализующее пусковой механизм, задающее энер-

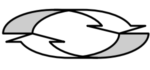
гию активизации и способ активизации; o/O – фрактальные образы (O – масштаб), определяющие цели, потребности, ситуации действительности, действия и т.д. Механизмы реализации отображений характеризуются энергетикой E_μ и потребными ресурсами R_μ ($\mu = \mu(E_\mu, R_\mu)$). Любой образ является фрактальным кластером, и его активизация автоматически переносит часть энергии на образы всего кластера (для возбуждения какого-либо образа нужен энергетический резонанс). Распространение энергетического резонанса по вычислительной среде грубо можно сравнить с потоком воды через сильно изрытую каналами местность, при этом «изрытость» динамически меняется в зависимости от контекста текущей ситуации, в частности, активизации «центров желаний» или «болевых точек», которые рефлекторно запускают защитные процессы.

Для слабоформализованных процессов теория синергетического интеллектуального управления предоставляет уникальную возможность осуществить оптимизацию в «сверхбольшом» с преодолением притяжения системы к нежелательным аттракторам и попаданием в область притяжения целевого, желаемого аттрактора [2], [3]. В процессе очередной фазы расширения (при условии, что уже выбрана модель поведения системы) осуществляется оптимизация значений параметров порядка на коротком интервале времени (оптимизация на очередной малый цикл или несколько таких циклов). Такая оптимизация «в коротком» делает поведение объекта предсказуемым посредством универсального способа экстраполяции [2], [3], [5], [6]. Таким образом, предлагаемая модель интеллектуального синергетического управления дает возможность решения проблемы «безмодельного управления», при котором конкретная математическая модель управляемого объекта не известна ни на стадии разработки (проектирования) контура управления, ни в процессе его функционирования.

Модель интеллектуального синергетического управления

Модель интеллектуального синергетического управления можно представить как бесконечный итерационный процесс вида

функтор – хаос (фаза расширения)



функтор – порядок (фаза сжатия)

Конкретизируем данное представление. Для оценки истинности некоторой информации X введем оператор $\chi(X)$, принимающий три значения: *true*, *false*, *«?»* (*unknown*). Если $\chi(X)$ = *true*, то будем считать, что информация X не противоречит имеющимся знаниям (в текущий момент времени). Пусть X – априорная информация, R – ресурсы, I – целевое предписание, тогда *оператором замыкания* λ назовем отображение вида:

$$\lambda_{R,I} : X \to X^+, \quad \chi(X^+) = true, \tag{1}$$

где X^+ – максимум с точки зрения I достоверной (правдоподобной) информации о прошлом, настоящем и будущем поведении системы, которую можно получить, используя ресурсы R и априорную информацию X. Объем информации X^+ всегда ограничен сверху ($|X^+| < \infty$), так как всегда ограничены ресурсы.

Предельные свойства оператора замыкания характеризуются следующей логической цепочкой: $\forall X$, если $\lambda_{R,I} : X \to X^+$, то $\lambda_{R,I} : X^+ \to X^+$, $\chi(X^+) = true$. Однако в отличие, например, от замыкания в теории реляционных баз данных символ «X^+» не всегда означает связь с априорной информацией X. Благодаря наличию ресурсов для диагностики вполне возможна следующая ситуация: $\lambda_{R,I}: \varnothing \to X^+$.

Оператор замыкания реализует фазу расширения (хаоса). Он не изменяет действительности, его задачей является получение (в текущий отрезок времени) максимума правдоподобной информации о действительном и возможном поведении системы в прошлом, настоящем и будущем. Подобная информация служит основой для решения задачи управления. При реализации оператора замыкания широко используются когнитивные методы, в частности, базы знаний, методы data mining, абдуктивный и индуктивный выводы, что во многом обуславливает свойства данного оператора, которые будут рассмотрены ниже. Мощность оператора замыкания во многом определяется доступными в текущий момент ресурсами (объем ресурсов может меняться скачкообразно и не всегда управляемым образом). Ресурсы R могут включать в себя вычислительные, информационные, кадровые, финансовые, энергетические, материальные ресурсы. Если оператор замыкания реализует интеллектуальный программный агент, то в качестве информационного ресурса желательно использование Многоцелевого Банка Знаний (МБкЗ) [6], [7].

Рассмотрим вопрос о существовании и единственности результата замыкания. Из-за наличия оператора χ возможна ситуация, при которой $\lambda_{R,I}$: $X \rightarrow \varnothing$ Такое возможно, если $\forall Y \subseteq X$ будет иметь место $\chi(Y) = false$, а ресурсов недостаточно для получения новой правдоподобной информации. Таким образом, в общем случае оператор λ не является рефлексивным и монотонным. Для некоторых приложений можно потребовать рефлексивность оператора замыкания, обеспечив: $X \subseteq \lambda(X)$, а также монотонность, что формально означает: если $X_1 \subseteq X_2$, то $\lambda(X_1) \subseteq \lambda(X_2)$.

В духе синергетики оператор замыкания может быть реализован на основе мультиагентной технологии, при этом у каждого агента может быть своя функция истинности. Если не определена единая функция истинности, то возможна следующая ситуация [6]:

$$\lambda_{R,Im} : X \rightarrow \{X^{+}_{(i)} |\ \chi_i(X^{+}_{(i)}) = true,\ (i = 1, \ldots, k)\}, \qquad (2)$$

где χ_i – функция истинности i-го агента. Если рассматривать процедуру замыкания во времени (итерации), а на последовательных интервалах времени (итерациях) доминирует тот или иной агент, то (2) означает хаотическое или периодическое переключение с одного результата на другой, следовательно, отсутствует сходимость итераций, а значит, отсутствует точка неподвижности операторного уравнения (цель I фиксирована):

$$\lambda(X) = X \text{ или } \lambda_R(X) = X, \quad \chi_i(X) = true\ (i = 1, \ldots, k). \qquad (3)$$

Одним из вариантов получения согласованного решения является следующий:

$$\lambda_{R,\,I} : X \rightarrow X^{+} = \cap_{\mathrm{i}} \{X^{+}_{(i)} |\ \chi_i(X^{+}_{(i)}) = true,\ (i = 1,\ldots, k)\}. \qquad (4)$$

Более сложные варианты консилиумов интеллектуальных агентов рассматриваются в [5], [8]. Далее будем предполагать, что каким-либо образом определена единая функция истинности, следовательно, если решение уравнения (3) существует, то оно единственно.

Самая общая формулировка цели I звучит так: «С помощью имеющихся ресурсов привести систему в состояние относительной нормы». Предположим существование конечного множества моделей поведения динамической системы или моделей ситуаций $M = \{m\}$, таких, что любая ситуация действительности α (например, динамический процесс) относится к какой-либо модели из M и для каждой модели m заранее определено синергетическое управление π_m, задающее целевой притягивающий аттрактор и параметры порядка $\{p\}_m$. Более конкретно цель I можно сформулировать следующим образом: «Действовать согласно модели ситуации m» (такая цель совпадает

с формулировкой стратегии). Следовательно, без потери общности можно записать: $\lambda_{R,\,I} \equiv \lambda_{R,\,m}$. Модель ситуации m определяется в результате решения диагностической задачи в фазу расширения.

Представим синергетическое управление π_m в виде серии этапов, а именно: $\pi_m = <f_1/\delta_1, f_2/\delta_2, \ldots, f_n/\delta_n>$, где f_j – требующий конкретизации закон управления на j-м этапе (корректировка значений параметров порядка $\{\underline{p}\}$), а δ_j – предполагаемая длительность этапа. Конкретизацию закона управления на j-м этапе обозначим $\underline{f_j}/\underline{\delta_j}$. Выбор модели m назовем стратегией управления. Без потери общности будем считать, что оператор замыкания выполняется на старте программы управления и в моменты смены этапов, т.е. в промежуточные фазы расширения. Моменты смены программ управления π_m (точки бифуркации) обозначим через t^*.

Агент или центр принятия решений (ЦПР) может управлять поведением системы не только напрямую, но и через давление (возмущения) внешней среды υ (ЦПР расходует часть ресурсов на управление свойствами внешней среды). Таким образом, управляемое поведение системы подчиняется как плану, формируемому ЦПР, так и управляемому или неуправляемому «давлению» со стороны внешней среды. Примером воздействия среды на поведение человека является реклама здорового образа жизни, запрет курения в общественных местах, коррекция поведения родителей ребенка, экологические мероприятия и т.д. Программу воздействия через среду, связанную с ситуацией m, обозначим π_V.

Фазу сжатия (фазу движения к целевому аттрактору) на произвольном интервале $[t1, t2] \subseteq \delta_j$ ($j = 1, \ldots, n$) будем описывать с помощью *оператора перехода*

$$\Psi_{[t1,\,t2],\,R\Psi} : X(t1),\, u([t1, t2]),\, \upsilon([t1, t2]) \rightarrow X(t2), \quad t^* \notin [t1, t2], \quad (5)$$

где $u([t1, t2])$ – управление на отрезке времени $[t1, t2]$; $\upsilon([t1, t2])$ – возмущения; R_Ψ – доступные ресурсы на оперативное управление (они не включают в себя ресурсы на u, но $R_\Psi \subset R$). Для оператора перехода не указана цель, так как предполагается, что данный оператор реализует движение в области притяжения целевого аттрактора, а также процедуру мониторинга контрольных параметров модели ситуации m.

Критерием качества работы оператора перехода является максимальное соответствие ситуации действительности в момент $t2$, т.е. $min\ \rho_m(\alpha(t2), X(t2))$ (при заданном управлении u на отрезке $[t1, t2]$). В некоторых приложениях можно потребовать максимального соответствия в серии контрольных точек на отрезке $[t1, t2]$.

Для упрощения записи оператора перехода будем использовать эквивалентную нотацию (R_Ψ фиксированы): $\Psi_{[t1,\,t2]}(X(t1), u, \upsilon)$. Рассмотрим основные свойства оператора перехода в предположении, что нет срыва управления (нет смены модели поведения системы), т.е. нет точки бифуркации.

Если $t1$ совпадает с любым моментом δ_j/δ_{j+1} ($j = 0, \ldots, n\text{-}1$; $\delta_0 = t^*$), то будем полагать:

$$\Psi_{[t1,\,t2]}(X(t1), u, \upsilon) = \Psi_{[t1,\,t2]}(\lambda_{R(t1)}(X(t1)), u, \upsilon) = \Psi_{[t1,\,t2]}(X^+(t1), u, \upsilon). \quad (6)$$

Если $[t1, t2] \subseteq \delta j$ ($j = 1, \ldots, n$), то $\forall\ t \in (t1, t2)$ справедливо:

$$\Psi_{[t1,\,t] \cup [t,\,t2]}(X(t1), u, \upsilon) = \Psi_{[t,\,t2]}(\Psi_{[t1,\,t]}(X(t1), u, \upsilon), u, \upsilon). \quad (7)$$

Если любой момент $t = \delta_j/\delta_{j+1}$ ($j = 1, \ldots, n-1$) принадлежит интервалу $(t1, t2)$, то в силу (6) соотношение (7) для разбиения $[t1, t] \cup [t, t2]$ не выполняется.

Если $[t1, t2] \subseteq \delta_j$ ($j = 1, \ldots, n$) и $X(t1) \subseteq X'(t1)$, то будем полагать:

$$\rho_m(\alpha(t2), \Psi_{[t1,\,t2]}(X'(t1), u, \upsilon)) \leq \rho_m(\alpha(t2), \Psi_{[t1,\,t2]}(X(t1), u, \upsilon)), \quad (8)$$

где $\alpha(t2)$ – срез в момент времени $t2$ ситуации действительности α. Другими словами, чем больше информации в момент $t1$, тем прогноз может быть ближе к действитель-

ности. Данное свойство показывает целесообразность реализации оператора замыкания максимальной мощности.

Если $\exists j : t^* \in \delta_j$, то оператор перехода немедленно останавливает дальнейшую реализацию выбранной тактики и передает управление стратегическому уровню (выбору модели m). Ресурсы R_Ψ должны обеспечить выполнение подобного мониторинга параметров модели m.

В определенной степени можно считать, что оператор λ отражает аналитические способности управляющего агента и его команды, а оператор Ψ – исполнительские навыки, обеспечивающие реализацию намеченной программы.

Если через t обозначить время смены этапов δ_{j-1}/δ_j ($j = 1, \ldots, n$; $\delta_0 = t^*$), а через (t+1) время δ_j/δ_{j+1}, то с учетом приведенных выше свойств, соотношения, описывающие интеллектуальное синергетическое управление динамической системой (процессом), примут следующий вид:

$$X(t+1) = \lambda_{R(t+1),\, m}\,(\Psi_{[t,\, t+1],\, R\psi}\,(X(t)),\ u([t,\, t+1]),\ \upsilon([t,\, t+1]))),\ \ New\ \ t^* \notin [t,\, t+1] \qquad (9)$$

$$X(t^*) = \lambda_{R(t^*),,m}\,(\,X(t^*)),\ \chi_{t^*}\,(X(t^*)) = true, \qquad (10)$$

$$\chi_t(X(t)) = true,\ \chi_{t+1}(X(t+1)) = true, \qquad (11)$$

$$u([t,\, t+1]) = \underline{f_j}/\underline{\delta_j} \equiv \{\underline{p}\}_{m,j}, \qquad (12)$$

$$\upsilon\,([t,\, t+1]) = \upsilon(\pi_V) \otimes \upsilon', \qquad (13)$$

$$\Sigma_{t'\le t}\ \rho_m(\alpha(t'), \Psi_{[t'-1,\, t'],\, R\psi}\,(X'(t'-1),\, u,\, \upsilon)) > \rho^* \Rightarrow\ \Diamond\!\uparrow R(t+1), \qquad (14)$$

$$\Sigma_{t'\le t}\ \rho_m(\alpha(t'), \Psi_{[t'-1,\, t'],\, R\psi}\,(X'(t'-1),\, u,\, \upsilon)) < \rho^{**} \Rightarrow\ \Diamond\!\downarrow R(t+1), \qquad (15)$$

где $\underline{f_j}/\underline{\delta_j}$ – конкретизация закона управления на j-м этапе (уточнение параметров порядка); нотация «$\upsilon(\pi_V) \otimes \upsilon'$» означает композицию контролируемых и неконтролируемых возмущений или воздействий внешней среды; символы «◊↑» и «◊↓» обозначают соответственно возможность увеличения и снижения ресурсов (окончательное решение принимает управляющий агент); константы ρ^* и ρ^{**} являются частью параметров модели ситуации.

Траекторией системы (орбитой) будет упорядоченное множество

$$\{\,\Psi_{[t,\, t+1],\, R\psi}\,(X^+(t)),\ u,\ \upsilon)|\ \chi_t(X^+(t)) = true,\ \uparrow t\}. \qquad (16)$$

Благодаря действию оператора замыкания траектория (16) может иметь разрывный характер в моменты реализации оператора замыкания.

Моделирование фазы расширения

Фаза расширения при интеллектуальном управлении представляет собой ничто иное, как индивидуальное или коллективное мышление (в смысле, определенном выше). Инструментом мышления в рассматриваемом контексте является оператор замыкания, который реализуется на основе модели предметной области. Модель ПрО представим в виде кортежа $<O, k, M>$, где O – модель онтологии этой предметной области, а k – модель адекватной системы знаний (в смысле оператора χ). В развернутом виде модель знаний k представим следующим образом [6], [9]:

$$k = \{f/\mu : k^1 \rightarrow k^2\} \cup P_k, \qquad (17)$$

где f/μ – отображения, реализующие те или иные математические модели; μ – разные механизмы реализации отображений (со своей энергетикой и ресурсами); k^1 – вход-

ные данные задачи (описание информационной среды и задание); k^2 – выходные данные задачи; P_k – правила композиции схем задач, т.е. правила, описывающие способы объединения локальных задач.

Модель знаний (17) полностью отвечает синергетическим принципам: представляет собой взаимодействие (в процессе решения задачи) большого числа квантов знаний, представляемых отображениями; любой вычислительный процесс существенно нелинейный, так как является композицией различных отображений (детерминированных, нечетких, нейросетевых, агентных и т.д.); система открытая, так как активно осуществляется обмен с внешней средой (участие в консилиумах, непрерывный поиск информации в агентной среде и в Интернете); кванты знаний в общем случае имеют фрактальную структуру [9]; метод предельных обобщений (МПО) описывает процессы горизонтальной и вертикальной самоорганизации, формируя минимальные неизбыточные модели знаний на любом уровне общности [7]. «Параметры порядка» в знаниях – перечень тестов минимальной неизбыточной модели знаний с доменами максимального уровня общности. Таким образом, МПО создает степени свободы в описании ситуаций действительности, что, согласно принципам синергетики, создает предпосылки для возникновения процессов самоорганизации.

Приведем спецификации задач некоторых классов моделей знаний ($\underline{\tau}/T$ –результаты тестов; $\underline{t}/\Lambda$ – моменты времени; $<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>$ – события; d/D – заключения, диагнозы; h/H – прогностические гипотезы; r/R – программы управления; T, Λ, D, H, R – сорта или домены; J – оператор оценки истинности произвольной формулы φ):

$F_1 = \{f/\mu\text{:}\ \{\underline{\tau}/T\}_1 \to \{\underline{\tau}/T\}_2\}$ – класс моделей вычислительных знаний;

$F_2 = \{f/\mu\text{:}\ \{<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>\} \to d/D\}$ – класс моделей диагностических знаний;

$F_3 = \{f/\mu\text{:}\ \{<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>\} \to \neg d/D\}$ – класс моделей знаний, описывающих область запретов;

$F_4 = \{f/\mu\text{:}\ \{<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>\}, \{d/D\} \to \{h/H\}\}$ – класс моделей прогностических знаний;

$F_5 = \{f/\mu\text{:}\ \{<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>\}, \{d/D\}, \{h/H\} \to \{r/R\}\}$ – класс моделей знаний по оптимизации управления;

$F_6 = \{f/\mu\text{:}\ \{<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>\} \to \{<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>\}'\}$ – класс моделей знаний, представляющий собой совокупность причинно-следственных связей (как структурных, так и временных);

$F_7 = \{f/\mu\text{:}\ \{J_\beta \varphi\}, \{<\underline{\tau}/T, \underline{t}/\Lambda>\} \to \{J_\gamma \varphi\}'\}$ – класс моделей знаний, позволяющий изменять оценку истинности формул – отображений в зависимости от тех или иных событий действительности (отображения могут принадлежать любому из классов F_1 – F_6). Оценка истинности в общем случае имеет фрактальную структуру.

Общая модель знаний k включает в себя все упомянутые выше классы моделей, а именно: $F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup F_4 \cup F_5 \cup F_6 \cup F_7 \subseteq k$. Модель предметной области $<O, k, M>$ является частью МБкЗ. Она учитывает как формально-логический, так и процедурный уровни представления знаний. Прикладные аспекты построения Банка математических моделей рассматриваются в [6], [7].

Без ограничения общности предположим, что любую ситуацию действительности можно описать с помощью множества элементарных тестов, которые будем обозначать a, b, c, d, $\{a\}$ и т.д. Примем также, что все тесты разбиваются на два подмножества: первичные тесты, т.е. тесты, значения которых должны быть заданы извне, и вычисляемые тесты, значения которых определяются на основе модели (17).

В соответствии с методом предельных обобщений [7] для каждого теста зададим ориентированный граф доменов, а для фиксации уровня общности будем использовать нотацию: a/A, где A – конкретный домен. Любой домен содержит полное множество

значений теста на соответствующем уровне общности (гипотеза о замкнутости мира). Для обозначения результата теста будем использовать нотацию: $\underline{a}/A$. В рамках графа доменов любого теста задаются правила пересчета значений из каждого домена в другие – вышестоящие домены. Эти правила запишем так: $A \rightarrow A'$. Для правил пересчета выполняется закон транзитивности: если $A \rightarrow A'$, $A' \rightarrow A''$, то $A \rightarrow A''$. Существует также базовый или начальный домен (обозначим его A_0), у которого нет предка, а именно: $\neg\exists A \neq A_0 : A \rightarrow A_0$. Очевидно, значения из базового домена можно пересчитать в значения любого другого домена из ориентированного графа. В общем случае граф доменов имеет фрактальную структуру, которая задается фрактальным конфигуратором [3], [4]. Таким образом, в рамках метода предельных обобщений справедлива аксиома:

$$\underline{a}/A \rightarrow \{\underline{a}/A' \mid A \rightarrow A'\}. \quad (18)$$

Знак «→» здесь и далее будет означать возможность вычисления, выводимость и т.д.

Пусть $W(\{a/A\})$ – некоторое многообразие на множестве тестов $\{a/A\}$, тогда примем следующую аксиому:

$$W(\{a/A\}) \rightarrow W(\{a/A'\}) \text{ для любого } \{a/A' \mid A' \rightarrow A\}. \quad (19)$$

Аксиома (19) означает, что многообразие на любом уровне общности полностью определяет соответствующие многообразия на нижележащих уровнях.

С учетом принятых допущений любое отображение модели знаний k можно представить следующим образом:

$$f/\mu_f\colon \{b/B\} \rightarrow \{a/A\}, \text{ для } \{\underline{c}/C\} \in W_f(\{c/C\}),\ \mu_f \in \{\mu\}_f \quad (20)$$

или в альтернативной записи:

$$\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}, \text{ для } \{\underline{c}/C\} \in W_f(\{c/C\}). \quad (21)$$

Разные механизмы могут реализовывать, например, разные агенты. Запись $\{a/A\} \lrcorner \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ будем понимать как существование механизма в рамках фиксированного исчисления, позволяющего получить нужный результат.

Наличие многих механизмов $\{\mu\}_f$ скорее всего приведет к тому, что под результатами вычислений следует понимать мультимножество $\{\underline{a}/A\}$, т.е. множество, допускающее повторение элементов. В дальнейшем именно так будем трактовать результаты вычислений.

Отображение (20) не обязательно будет монотонным. Может оказаться так, что при добавлении новой информации существенно изменится алгоритм (механизм) вычислений, например:

$$g/\mu_{g+}\colon \{b/B\}, \{d/D\} \rightarrow \{a/A\}, \text{ для } \{\underline{c}/C\} \in W_f(\{c/C\}),\ \mu_g \in \{\mu\}_g. \quad (22)$$

В приведенном примере добавление информации $\{d/D\}$ привело к замене отображения. При этом могут отличаться не только результаты вычислений (например, точность), но также и другие параметры, например, время вычислений, энергозатраты (стоимость) и т.д.

Приведем пример. Пусть S – площадь поверхности тела человека, м^2; B – масса тела, кг; L – рост человека, м (единицы измерения означают домены). Определим отображение $f/\mu_f : B \rightarrow S$, где механизм μ_f основан на вычислениях по формуле: S = $= 0{,}107 \cdot \sqrt[3]{B^2}$ а отображение $g/\mu_g : B, L \rightarrow S$, где механизм μ_g основан на вычислениях по формуле: S = 167,2 $\sqrt{\mathrm{B} \cdot \mathrm{L}}$.

Используя нотацию (21), введем несколько важных определений.

Зависимость $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ назовем *избыточной в слабом смысле*, если $\exists\ \{b/B\}' \subset \{b/B\}$: $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}'$ на $W(\{c/C\})$. Другими словами, найдется под-

множество тестов, достаточное для расчетов на заданном многообразии. Всегда следует избавляться от избыточности в слабом смысле.

Зависимость $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ назовем *избыточной в сильном смысле*, если она неизбыточна в слабом смысле, но $\exists g$ и $\exists$ $\{b/B\}' \subset \{b/B\}$: $\{a/A\} \lrcorner_g \{b/B\}'$ на $W(\{c/C\})$. Данное определение имеет смысл только в условиях немонотонного вывода. Избавляться от избыточности в сильном смысле нужно очень осторожно, так как при этом может быть потеряна точность. Выигрыш может состоять, например, в меньшем времени, меньших ресурсах и меньшей стоимости расчетов, так как требуется меньше исходных данных.

Зависимость $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ назовем *избыточной локально*, если она неизбыточна в слабом смысле, но $\exists$ $\{b/B\}' \subset \{b/B\}$: $\{a/A\} \lrcorner_{f'} \{b/B\}'$ на $W'(\{c/C\}') \subset$ $\subset W(\{c/C\})$, где f' – проекция f на W'. Другими словами, найдется подмножество тестов, достаточное для расчетов на некотором подмногообразии заданного многообразия. Целесообразность нахождения локально неизбыточных отображений на подмногообразиях определяется тем, что в ситуациях действительности чаще всего могут встречаться те или иные подмногообразия, а реализация проекции f' может быть значительно проще или экономнее, чем f. В интеграле может быть достигнута значительная экономия определенных ресурсов. Зависимость может быть неизбыточна в сильном смысле, но избыточна локально и наоборот.

Интерес может представлять выявление для заданной зависимости всех локально неизбыточных зависимостей. В этом случае исходная зависимость может быть представлена в виде:

$$\cup_{j=1,n} \{\{a/A\} \lrcorner_{fj} \{b/B\}_j \text{ на } W_j(\{c/C\}_j)\},\ W = \cup_{j=1,n} W_j,\ W_j \cap W_k = \varnothing\ (j \neq k), \qquad (23)$$

где каждая зависимость $\{a/A\} \lrcorner_{fj} \{b/B\}_j$ на $W_j(\{c/C\}_j)$ $(j = 1, \ldots, n)$ является локально неизбыточной; f_j – проекция f на W_j.

Сфера действия неизбыточной в слабом смысле зависимости $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ может быть *расширена* на многообразие $W'(\{c/C\})$ при условии, что такое расширение сохраняет неизбыточность в слабом смысле. Будем говорить, что сфера действия неизбыточной в слабом смысле зависимости $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ *предельно расширена*, если не существует окаймляющего W многообразия, на которое допустимо расширение. Будем считать, что представление (23) основывается на предельно расширенной сфере действия каждой зависимости.

Зависимость $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ может быть *обобщена*, если $\exists$ $\{b/B' \mid B \rightarrow B'\}$ и/или $\exists$ $\{c/C' \mid C \rightarrow C'\}$ и $\exists$ g : $\{a/A\} \lrcorner_g \{b/B'\}$ на $W'(\{c/C'\})$, при этом $W'(\{c/C'\}) \rightarrow W(\{c/C\})$. Будем говорить, что зависимость $\{a/A\} \lrcorner_f \{b/B\}$ на $W(\{c/C\})$ *предельно обобщена*, если не существует доминирующих описаний $\{b/B' \mid B \rightarrow B'\}$ и $\{c/C' \mid C \rightarrow C'\}$ и отображения g, до уровня которых возможно обобщение. Для понимания сути данного определения важна аксиома (19).

Пусть $\{a\}$ – произвольные вычислимые тесты, а $\{b\}$ – множество первичных тестов, тогда интерес представляет следующая задача: для заданного уровня общности $\{a/A\}$ найти все возможные предельно обобщенные, предельно расширенные, неизбыточные (в слабом смысле) зависимости вида

$$\{a/A\} \lrcorner \{b/B\}_j \text{ на } W_j(\{c/C\}_j),\ j = 1, \ldots, n. \qquad (24)$$

Представляется целесообразным именно такие зависимости хранить в базе знаний (модели знаний k). Формироваться подобные зависимости могут в результате самоорганизации на основе фрактальной модели знаний [3], [4], [9].

Рассмотрим общую схему работы оператора замыкания λ.

Пусть Σ – рабочая область, в которой хранятся все значения тестов. Для помещения результатов тестов в рабочую область будем использовать нотацию $\{\underline{b}/B\} \mapsto \Sigma$ (при выполнении данной операции применяется тот или иной механизм разрешения противоречий). Через Σ_f обозначим вспомогательную область, в которую будем помещать пары <Отображение/механизм; Значение тестов, к которым применялось или отображение> или $<f/\mu, \{\underline{b}/B\}>$. Для помещения данных во вспомогательную область также будем использовать нотацию $<f/\mu, \{\underline{b}/B\}> \mapsto \Sigma_f$. База данных DB является частью модели знаний и содержит множество ситуаций действительности $\{\alpha\}$. Новые ситуации могут поступать в базу данных непрерывно. Самоорганизация знаний на основе метода предельных обобщений приводит к непрерывной модификации модели знаний [7].

Ниже приведена общая схема работы оператора замыкания λ.

Вход: $\{\underline{d}/D\}$;
Шлюзы поступления информации извне: $\{\alpha\} \mapsto$ DB;
Самоорганизация модели знаний [7]: МПО: DB, $k(t) \to k(t+1)$;
Инициализация: $\Sigma = \Sigma_f = \varnothing$;
Начальные данные: $\{\underline{d}/D\} \mapsto \Sigma$;
В цикле пока не наступит стабилизация Σ:

Если $\{\underline{c}/C\} \in \Sigma$ и $\{\underline{c}/C\} \in W_f(\{c/C\})$ и $\{\underline{b}/B\} \in \Sigma$ и $<f/\mu, \{\underline{b}/B\}> \notin \Sigma_f$, то выполнить: $f/\mu : \{\underline{b}/B\} \to \{\underline{a}/A\}$, $\mu \in \{\mu\}_f$, $f \in k$;

$\{\underline{a}/A\} \mapsto \Sigma$; $<f/\mu, \{\underline{b}/B\}> \mapsto \Sigma_f$;

$\forall\ \underline{a}/A \to \{\underline{a}/A' \mid A \to A'\}$; $\{\underline{a}/A'\} \mapsto \Sigma$;

Если $\{\underline{b}\}/B \in \Sigma$ и $<g, \{\underline{b}\}/B> \notin \Sigma_f$, то выполнить: $g : \{\underline{b}\}/B \to \neg(B \setminus \{\underline{b}\}/B)$;

$\neg(B \setminus \{\underline{b}\}/B) \mapsto \Sigma$; $<g, \{\underline{b}\}/B> \mapsto \Sigma_f$;

Если $\exists\ f/\mu : \{b/B\} \to a/A$ на $W_f(\{c/C\})$, $\underline{a}/A \in$ ОЗ$_f$ и $\neg\underline{a}/A \in \Sigma$ и $\{\underline{c}/C\} \in \Sigma$ и $<h_f, \neg\underline{a}/A> \notin \Sigma_f$, то выполнить: $h_f : \neg\underline{a}/A \to \neg_{\mathrm{f}}\ \underline{a}/A = \neg\{\{\underline{b}/B\} \mid f/\mu : \{\underline{b}/B\} \to \underline{a}/A,\ \mu \in \{\mu\}_f,\ \{\underline{c}/C\} \in W_f(\{c/C\}), f \in k\}$; $\neg_{\mathrm{f}}\ \underline{a}/A \mapsto \Sigma$; $<h_f, \neg\underline{a}/A> \mapsto \Sigma_f$.

Окончание цикла либо по стабилизации состояния Σ, либо по окончании времени.
Выход: Σ.

Заключение

Построена модель интеллектуального синергетического управления динамическим процессом, которая обладает рядом полезных свойств, среди которых – нежесткие требования к формализму, учет имеющихся ресурсов и изменчивости критериев истинности, невысокая чувствительность модели к априорной полноте описания состояний, высокая способность к адаптации в изменяющейся среде, учет реальной компетентности управляющего агента. Эти свойства становятся решающими при управлении поведением социальных и живых систем.

Операторы замыкания (фаза расширения) и перехода (фаза сжатия), модели поведения, фрактальные конфигураторы, фрактальная организация знаний, метод предельных обобщений, поведенческие и мыслительные аттракторы – это базовые основополагающие понятия концептуального лексикона развиваемой теории синергетического интеллектуального управления, определяющие ее сущность, новизну и содержание.

Литература

1. Осипов Г.С. Динамические интеллектуальные системы / Г.С. Осипов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 47-54.
2. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза / Колесников А.А. – М. : Едиториал УРСС, 2006. – 240 с.
3. Прокопчук Ю.А. Синергетическая теория управления медико-социальными процессами / Ю.А. Прокопчук // Вестник ХНТУ. – 2009. – № 1(34). – С. 378-384.
4. Прокопчук Ю.А. Модель синергетического управления динамическими системами и процессами / Ю.А. Прокопчук // Збірник наукових праць Міжнародної конференції [«Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту»], (Євпаторія, 18 – 22 травня 2009 р.). – Херсон : ХНТУ, 2009. – Том 2. – С. 412-416.
5. Прокопчук Ю.А. Интеллектуальные медицинские системы: формально-логический уровень / Прокопчук Ю.А. – Днепропетровск : ИТМ НАНУ и НКАУ, 2007. – 259 с.
6. Информационные технологии в образовании и здравоохранении / А.П. Алпатов, Ю.А. Прокопчук, О.В. Юденко, С.В. Хорошилов. – Днепропетровск : ИТМ НАНУ и НКАУ, 2008. – 287 с.
7. Прокопчук Ю.А. Многоцелевой банк знаний в области клинической медицины / Ю.А. Прокопчук // Вестник ХНТУ. – 2008. – № 1(30). – С. 14-20.
8. Прокопчук Ю.А. Проведение врачебных консилиумов с участием интеллектуальных систем / Ю.А. Прокопчук // Вестник ХНТУ. – 2007. – № 4(27). – С. 198-202.
9. Прокопчук Ю.А. Метод предельных обобщений – эффективный принцип работы вычислительного интеллекта / Ю.А. Прокопчук // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 727-736.

Ю.О. Прокопчук

Інтелектуальне синергетичне управління динамічними системами

Побудована модель інтелектуального синергетичного управління динамічними системами, що має ряд корисних властивостей, серед яких – нежорсткі вимоги до формалізму, облік наявних ресурсів і мінливості критеріїв істинності, невисока чутливість моделі до апріорної повноти опису станів, висока здатність до адаптації в середовищі, що змінюється, облік реальної компетентності керуючого агента. Ці властивості стають вирішальними при керуванні поведінкою природних, соціальних і живих систем.

Yu.A. Prokopchuk

Intellectual Synergetic Management of Dynamic Systems

The model of intellectual synergetic management of dynamic process is constructed. The model has the following properties: weak requirements to formalism, a consideration of resources and variability of criteria, low sensitivity to aprioristic completeness of the description, high ability to adaptation in the changing environment, account of real competence of the managing agent. These properties become deciding in management of medical and social and alive systems behavior.

Статья поступила в редакцию 14.05.2009.